
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.533; 621.81-25.001.4

С.М. Дмитриев¹, И.В. Друмов²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА МОДЕЛИ РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕАКТОРОМ С ГАЗОВОЙ ТУРБИНОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»²

Изложены преимущества и особенности высокотемпературных реакторов с газовой турбиной, в частности, система электромагнитного подвеса ротора турбомашин. Описана программа и некоторые результаты исследований.

Ключевые слова: электромагнитный подвес, ротор, турбомашин, атомная станция, высокотемпературный реактор, газовая турбина.

Введение

В настоящее время во всем мире ведутся работы по поиску альтернативных видов топлива, которые со временем придут на смену нефти и газу [1]. Одной из наиболее перспективных альтернатив может стать водородное топливо, дающее в качестве выхлопа обычный водяной пар. Водород по своей "калорийности" почти в четыре раза превосходит бензин. Производство водорода в промышленных масштабах может осуществляться с использованием тепловой энергии ядерных высокотемпературных реакторов. Современные проекты таких реакторов обещают понизить себестоимость водородного топлива до уровня цены бензина, возможно, и ниже.

В ОКБМ работы по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам (ВТГР) ведутся с 1974 г. ВТГР является принципиально новым экологически чистым универсальным атомным энергоисточником. Его уникальные свойства – способность вырабатывать тепло с температурой до 1000°C и высокий уровень безопасности – определяют широкие возможности по использованию этого типа реактора для снабжения теплом технологических производств в различных энергоемких отраслях промышленности, для производства электроэнергии с высоким КПД и экономичного производства водородного топлива.

На рис. 1 представлена общая схема ядерной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором в системе электроснабжения [2, 3, 4]. В реакторе происходит управляемая ядерная реакция, сопровождаемая нагревом теплоносителя. Управление этой реакцией, а также управление другими процессами на АЭС осуществляется автоматизированной системой управления технологическими процессами. Нагретый теплоноситель из реактора поступает в блок преобразования энергии, где он производит работу, связанную с вращением ротора турбомашин. Теплоноситель при этом охлаждается и возвращается в реактор. Генератор, являющийся частью турбомашин, преобразует энергию вращения в электрическую. Поскольку частота вращения ротора турбомашин и требования к

частоте напряжения, выдаваемого в электрическую сеть, в общем случае могут отличаться, то в составе оборудования предусматривается мощный преобразователь частоты.

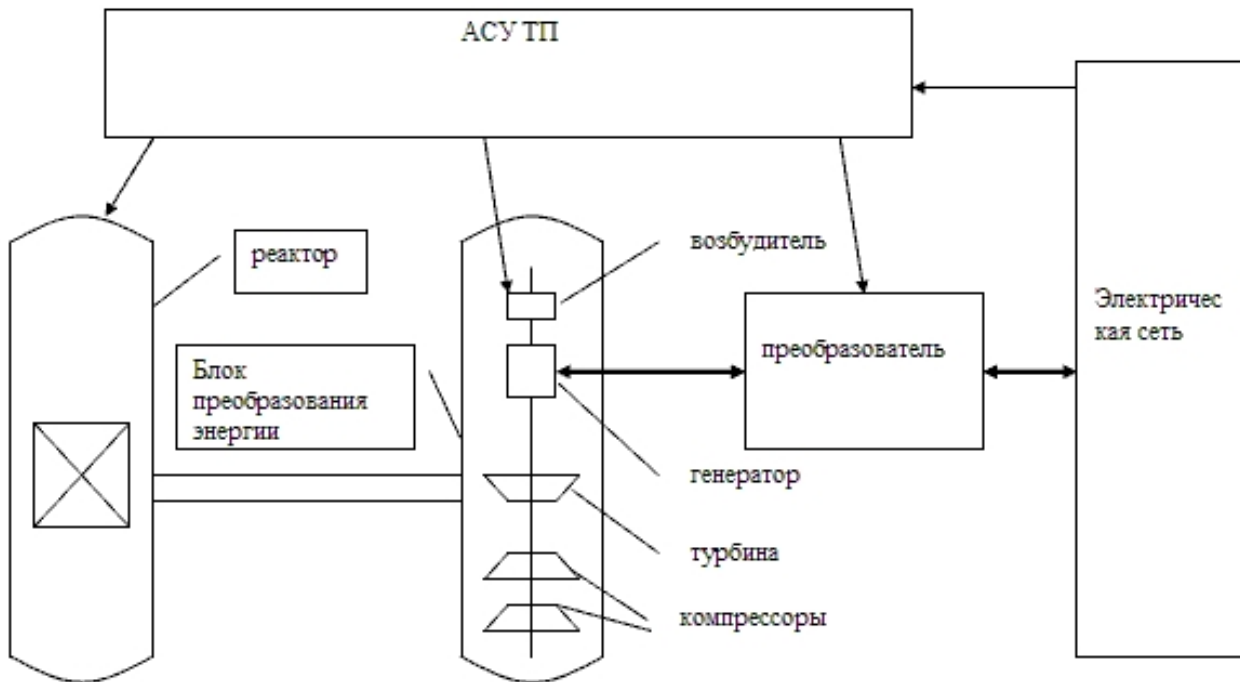


Рис. 1. Общая схема ядерной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором в системе электроснабжения

1. Использование электромагнитного подвеса ротора турбомашины АС с ВТГР

Одной из ключевых задач создания высокотемпературной ядерной установки с гелиевым теплоносителем является использование в качестве опор ротора турбомашины электромагнитного подвеса. Электромагнитный подвес позволяет повысить экологическую безопасность, КПД и ресурс энергоустановки за счет: бесконтактной работы, отсутствия системы масляной смазки, надежности и относительно невысокой стоимости обслуживания. Поэтому в составе блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором проектом предусмотрено использование турбомашины с ротором на электромагнитных подшипниках [5]. На рис. 2 представлено схематичное изображение турбомашины, показаны основные составные части турбомашины – турбокомпрессор, генератор, турбина, муфта, а также радиальные и осевые электромагнитные подшипники.

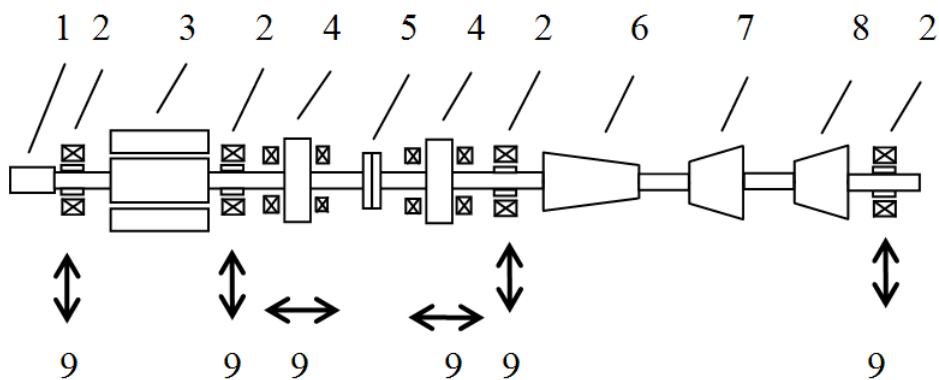


Рис. 2. Схематичное изображение турбомашины:

1 – возбудитель (верхняя часть ротора); 2 – радиальный электромагнитный подшипник; 3 – генератор; 4 – осевой электромагнитный подшипник; 5 – муфта; 6 – турбина;

7 – компрессор высокого давления; 8 – компрессор низкого давления; 9 – направления, в которых производится стабилизация ротора в центральном положении

Активные подшипники могут выпускаться в виде радиальных с цилиндрическим зазором, упорных с плоским зазором и радиально-упорных подшипников с коническим зазором. Полный электромагнитный подвес ротора состоит, как правило, из двух радиальных и одного упорного подшипников. Стрелками обозначены направления, в которых активные электромагнитные подшипники стабилизируют роторы генератора и турбокомпрессора.

2. Система электромагнитного подвеса ротора

В систему электромагнитного подвеса входят электромагнитные подшипники, датчики положения ротора, аппаратура и программное обеспечение системы управления, а также страховочные подшипники.

На рис. 3 представлена принципиальная схема радиального активного магнитного подшипника. Четыре электромагнита и четыре датчика положения расположены равномерно по окружности диаметрально противоположно. Роторная часть подшипника или ротор, выполненный из ферромагнитного материала «плавает» в магнитном поле, созданном четырьмя электромагнитами. Под воздействием электромагнитных сил ротор находится в состоянии равновесия. Положение ротора в рабочем зазоре опоры определяется с помощью датчиков, которые непрерывно фиксируют все возможные перемещения.

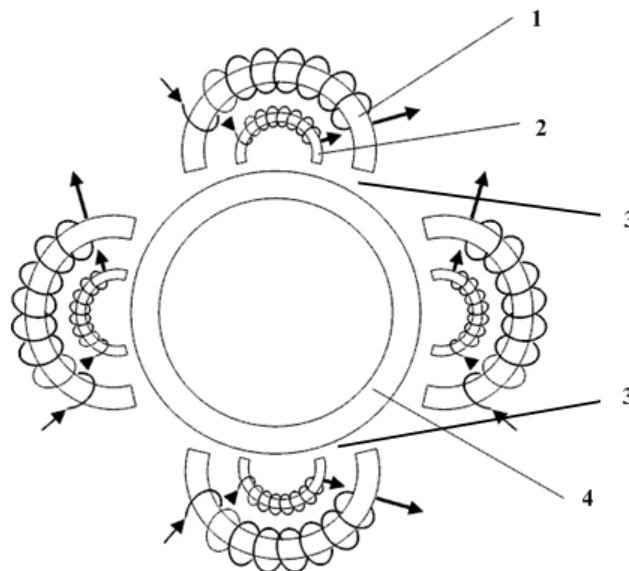


Рис. 3. Принципиальная схема радиального активного магнитного подшипника:

1 – статор электромагнита; 2 – датчик положения; 3 – воздушный зазор; одинаков с противоположных сторон ротора; 4 – ротор

Управление работой системы электромагнитных подшипников производится системой управления [6, 7]. На рис. 4 представлена функциональная схема реализации управления положением ротора по одному каналу. Данная схема обеспечивает управление положением ротора в ЭМП по одной координате и входит в состав одного канала управления. Количество таких каналов определяется количеством координат: осевой ЭМП обеспечивает управление положением ротора по одной координате (Z), каждый из четырех радиальных ЭМП обеспечивает управление положением ротора по двум координатам (X и Y) относительно вертикальной оси РЭМП. Учитывая рассматриваемую структуру многоопорной системы, количество каналов управления положением ротора в ЭМП составляет девять (без учета резервирования).

Пунктиром на схеме выделены блоки, функции которых реализуются при помощи

средств вычислительной техники и программного обеспечения. Для реализации управления положением ротора контроллеры должны обеспечивать выполнение следующих функций:

Аналого-цифровое преобразование представляет собой преобразование аналогового сигнала датчика (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В) в n -разрядное двоичное число.

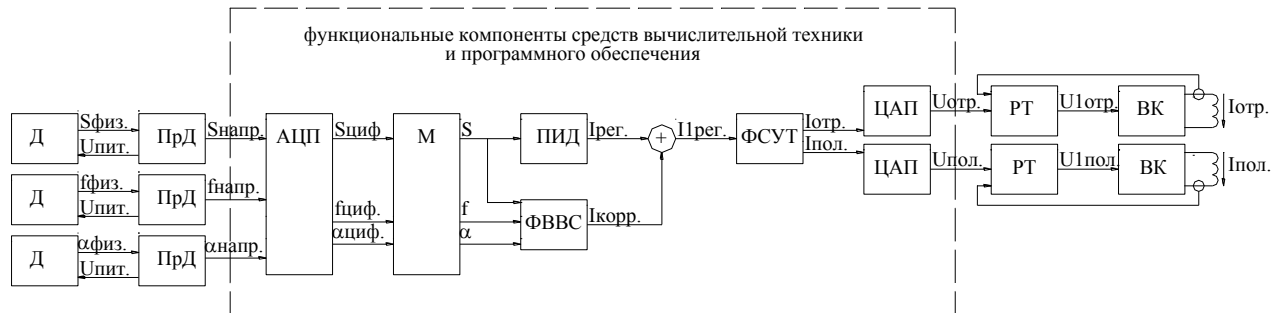


Рис. 4. Функциональная схема реализации управления положением ротора по одному каналу:

Д – датчик; ПрД – преобразователь датчика; АЦП – аналого – цифровой преобразователь; М – блок масштабирования; ПИД – регулятор положения ротора; ФВВС – блок формирования вектора виртуальных сил; ФСУТ – блок формирования сигналов управления током; ЦАП – цифро – аналоговый преобразователь; РТ – регулятор тока; ВК – выходной каскад; Sфиз, Sнапр, Sциф, S – смещение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированное соответственно; fфиз, fнапр, fциф, f – частота вращения ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и цифровой форме, масштабированная соответственно; αфиз, αнапр, αциф, α – угловое положение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой и в цифровой форме масштабированное соответственно; Iрег – ток регулятора; Iкорр – ток коррекции; Iрег – ток регулятора с учетом тока коррекции; Iотр и Iпол – заданные токи обмоток, расположенных в направлении отрицательных и положительных значений смещения соответственно; Uпит – напряжение питания; Uотр и Uпол – напряжения, задающие регулятору тока требуемую величину тока «отрицательной» и «положительной» обмоток; U1отр и U1пол – напряжения, управляющие выходным каскадом «отрицательной» и «положительной» обмоток

Масштабирование принятых значений сигналов представляет собой пересчет полученных значений входных сигналов в форме n -разрядных двоичных чисел в значения переменных, имеющих размерность и масштаб измеряемых физических величин в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов "датчик – преобразователь датчика".

ПИД- регулятор положения ротора, вычисляющий ток регулирования по формуле

$$I_{reg}(t) = K_p S(t) + K_d \frac{S(t) - S(t - \Delta t)}{\Delta t} + K_i S(t) \Delta t + K_i \Delta t \sum_{i=1}^n S(t - i \Delta t), \quad (1)$$

где t – время, с; K_p – коэффициент пропорциональности регулятора, А/мм; $S(t)$ – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени t , мм; K_d – коэффициент дифференцирования регулятора, А·мм/с; Δt – время цикла работы управляющего контроллера, с; $S(t - \Delta t)$ – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени $t - \Delta t$, мм; K_i – коэффициент интегрирования регулятора, А/(мм·с); n – количество циклов работы контроллера с момента включения регулятора; i – номер цикла контроллера.

Формирование вектора виртуальных сил представляет собой вычисление значения тока коррекции I_c по формуле

$$I_c = I_a \sin(\alpha + \varphi), \quad (2)$$

где I_a – величина вектора виртуальных сил, А; α - угловое положение ротора, рад; φ - угловое направление вектора виртуальных сил по оси I, рад;

При этом формирование вектора производится не постоянно, а только при определенных значениях частоты вращения ротора f (когда это значение находится в пределах одного из диапазонов резонансных частот ротора ТМ).

Формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов ЭМП представляет собой вычисление значений выходных напряжений контроллера для управления двумя противоположными обмотками электромагнитов по управляемой координате.

Цифроаналоговое преобразование представляет собой преобразование n -разрядного двоичного числа в аналоговый сигнал (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от 0 до 5 В).

3. Постановка задачи экспериментальных исследований

Опорные системы электромагнитных подшипников уже более 20 лет эксплуатируются в различных типах машин. Однако вертикальный ротор весом в несколько десятков тонн, вывешенный в электромагнитных подшипниках с зазором в десятые доли миллиметра относительно статора и имеющий четыре критические частоты, две из которых изгибные, делает конструкцию турбомшины уникальной. Для подтверждения работоспособности такой конструкции требуется не только расчетное обоснование, но и экспериментальное подтверждение.

Одними из важнейших направлений экспериментальных исследований являются:

- отработка методики физической балансировки ротора на электромагнитных подшипниках;
- определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса при вращении, в том числе на резонансных частотах, в условиях воздействия внешних сил;
- применение системы управления электромагнитными подшипниками для компенсации дисбаланса.

Для проведения этих исследований в ОКБМ созданы несколько исследовательских стендов, которые позволят подтвердить принципиальную возможность применения электромагнитного подвеса в установке подобной конструкции, получить реальные данные, позволяющие верифицировать методики расчетов и расчетные коды.

В настоящей работе описаны некоторые результаты экспериментальных исследований.

4. Отработка методов физической балансировки

На рис. 5 представлены формы колебаний вращающегося ротора одной из экспериментальных установок [8, 9] на полном электромагнитном подвесе. Эти формы соответствуют четырем критическим частотам ротора, причем третья и четвертая соответствуют изгибным частотам. Задача балансировки ротора в ЭМП [10, 11] сводится к идентификации форм колебаний ротора, определению углового направления и величины остаточного дисбаланса по каждой форме и расчету величин грузов, компенсирующих таким образом дисбаланс. Балансировка ротора проведена на каждой критической частоте, определенной по результатам снятия амплитудно-частотной характеристики. При проведении балансировки ротора были вычислены корректирующие грузы для варианта балансировки ротора по четырем формам колебаний. После установки системы балансировочных грузов на ротор было зафиксировано заметное снижение амплитуды колебаний ротора в районе ЭМП в диапазоне частот враще-

ния до 6000 об/мин. Таким образом, была частично верифицирована методика балансировки гибкого вертикального ротора в электромагнитном подвесе.

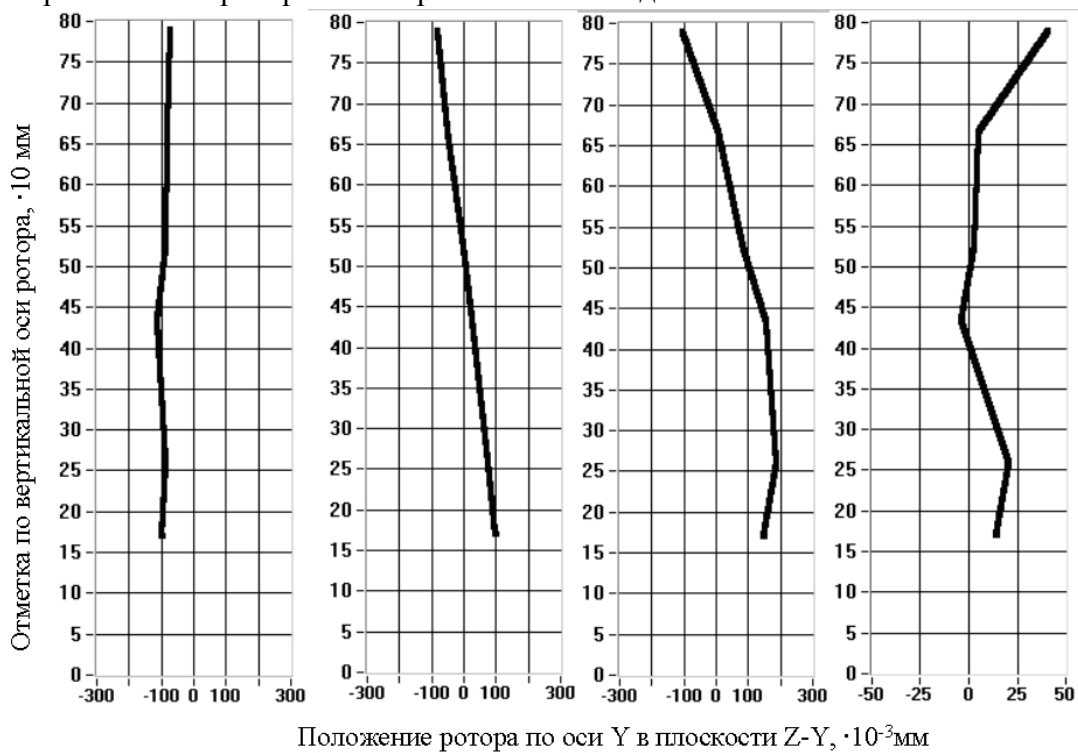
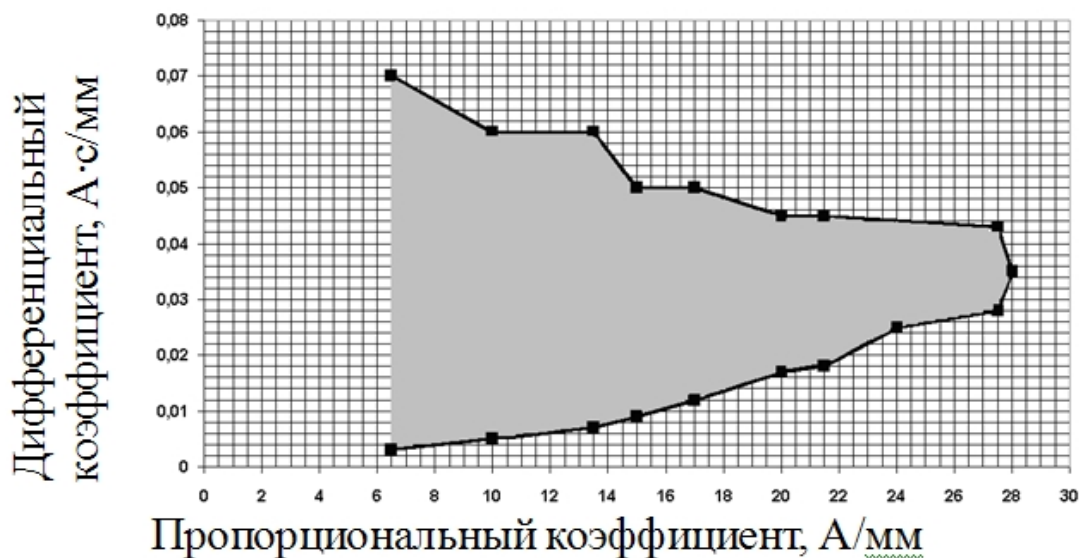


Рис. 5. Формы колебаний вращающегося ротора на полном электромагнитном подвесе

5. Определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса

При проведении расчетных исследований динамики ротора для ПД-регулятора рассчитывается область устойчивости в координатах настроечных коэффициентов регулятора. В последствие указанная область подтверждается экспериментально снятой кривой, характеризующей её границу. На рис. 6 показаны экспериментально определенные границы области устойчивости ПД-регулятора радиального электромагнитного подшипника. Если значения пропорционального дифференциального коэффициентов выбраны из этой области, то ротор ведет себя устойчиво во всем диапазоне частот вращения.



**Рис. 6. Экспериментально определенные границы области устойчивости
ПД-регулятора радиального электромагнитного подшипника**

По результатам исследований выбранного закона управления при различных частотах вращения ротора, а также других законов [8, 9] обоснован электромагнитный подвес описанной конструкции [9].

**6. Применение системы управления электромагнитными подшипниками
для компенсации дисбаланса**

Для обеспечения автоматического поддержания устойчивого вращения ротора при пуске и остановке при прохождении резонансных частот используется специальный закон управления, формирующий вектор «виртуальной» силы в электромагнитном подшипнике, что обеспечивает величину амплитуды колебаний ротора в заданной области относительно оси подшипников. На рис. 7 показана амплитуда колебаний ротора при вращении с включенным законом и с выключенным. Как видно из графиков, включение закона позволяет существенно уменьшить амплитуду колебаний ротора на резонансной частоте 65 Гц.



Рис. 7. Амплитуда колебаний ротора при вращении с включенным и выключенным законом

Результаты проведенных испытаний учитываются при верификации программного обеспечения расчетов динамики ротора в электромагнитном подвесе, статических и динамических характеристик электромагнитных подшипников, в проекте блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором.

Библиографический список

1. Официальный сайт ОАО «ОКБМ Африкантов» г. Нижний Новгород – 2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.okbm.nnov.ru/russian/hydrogen> (дата обращения: 17.07.2011).
2. **Маргулова, Т.Х.** Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова. – М.: Высш. шк., 1978. – 289 с.
3. **Shenoy, A.** US History of Direct Cycle Gas-Turbine HTGRs / A. Shenoy // Technical Committee Meeting on Gas Turbine Power Conversion Systems Meeting. November 15, 2000.

4. **Пономарев-Степной, Н.Н.** Возможности использования модульного гелиевого реактора ГТ-МГР для диспозиции оружейного плутония./ Н.Н. Пономарев-Степной [и др.] // ISSN 0869-6772. Конверсия в машиностроении 1999. №3–4.
5. **Kodochigov, N.** Electromagnetic suspension of vertical turbomachine for GT-MHR nuclear power plant / N. Kodochigov [at al.] // Proceedings of the 5. Workshop Magnetlagertechnik. – Zittau-Kassel, 2001. P. 107–114.
6. **Kodochigov, N.G.** Control system of electromagnetic bearing / N.G. Kodochigov [at al.] // 5. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2001. Zittau-Kassel. 2001. P. 59–68.
7. **Kodochigov, N.G.** Calculation and substantiation of the structure and composition of microprocessor controllers in the digital control system of electromagnetic suspension multisupport system / N.G. Kodochigov [at al.] // 6. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2003. – Zittau-Kassel. 2003. P. 161–169.
8. **Кодочигов, Н.Г.** Исследование методов стабилизации ротора с полным электромагнитным подвесом./ Н.Г. Кодочигов [и др.] // Материалы 6-й конференции по системам мехатроники, сентябрь 2003. – Кассель, ФРГ. 2003. С. 153–160.
9. **Mitenkov, F.M.** Electromagnetic Suspension of Vertical Turbomachine For Nuclear Power Plant./ F.M.Mitenkov [at al.] // Proceedings of conference "PHYSCON2003" Sanct -Peterburg, 2003. P. 146–151.
10. **Митенков, Ф.М.** Алгоритм определения дисбаланса ротора на электромагнитных опорах / Ф.М. Митенков [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 4. С. 9-14
11. **Митенков, Ф.М.** Влияние дисбаланса на нелинейную динамику вертикального ротора на электромагнитных подшипниках / Ф.М. Митенков [и др.] // Вестник ННГУ. Механика. 2009. №4. С. 110–114.

*Дата поступления
в редакцию 05.07.2011*

S.M. Dmitriev, I.V. Drumov

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELECTROMAGNETIC SUSPENSION SYSTEM FOR THE TURBO MACHINE ROTOR MODEL OF NUCLEAR POWER PLANT WITH HIGH-TEMPERATURE REACTOR AND GAS TURBINE

Advantages and features of high-temperature reactors with gas turbine are described in this paper, in particular, the electromagnetic suspension system for turbomachine rotor. Research schedule and some results are described.

Key words: electromagnetic suspension, rotor, turbomachine, nuclear plant, high-temperature reactor, gas turbine.